

액체로켓 연소기 재생냉각 채널 구조설계

류철성* · 정용현** · 최환석*

Structural Design of Liquid Rocket Thrust Chamber Regenerative Cooling Channel

Chul-Sung Ryu* · Yong Hyun Chung** · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

The structural analysis and water pressure test of regenerative liquid rocket thrust chamber cooling channel specimens are performed at room temperature. material properties of copper alloy are obtained by uniaxial tension test at room temperature and used of elastic-plastic structural analysis. The plate type of cooling channel specimen are manufactured and performed water pressure test in order to confirm the analysis results. The differences between results of elastic-plastic analysis and that of water pressure test of cooling channel specimen are small and find that manufacturing process affect the structural stability of cooling channel very much because cooling channel thickness is small

초 록

재생냉각형 액체로켓 연소기 챔버의 냉각 채널부의 상온상태의 구조설계와 검증시험을 수행하였다. 재생냉각 연소기 냉각 채널부에 사용하는 크롬동 합금의 상온 인장시험을 수행하여 재료의 탄소성 물성치를 확보하였으며 냉각 채널의 탄소성해석은 이 물성치를 이용하여 수행하였다. 해석결과의 검증을 위해서 평판형태의 냉각채널 시편을 제작하여 강도시험을 수행하였다. 탄소성 구조해석과 결과와 시편의 수압시험 데이터를 비교한 결과 구조해석과 시험이 약간의 차이는 있지만 비교적 잘 일치하였으며 채널의 단면 두께가 작기 때문에 제작상의 가공오차가 채널의 구조적인 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Key Words: Liquid Rocket Thrust Chamber(액체로켓 연소기), Regenerative Cooling Channel(재생 냉각 채널), Elastic-Plastic Structural Analysis(탄-소성 구조해석)

1. 서 론

* 한국항공우주연구원 연소기그룹
** 한국항공우주연구원 엔진그룹
연락처, E-mail: csryu@kari.re.kr

액체로켓연소기의 개발에 있어서 고온/고압
에서 작동하는 연소기 재생냉각 챔버의 설계는

매우 중요하다. 연소기의 작동시간이 증가하고 연소압력이 증가하면 복합재료를 이용한 흡열냉각 방식의 연소기 챔버는 재료의 삭마현상이 크게 발생하기 때문에 사용상의 한계가 있다. 따라서 고온/고압의 연소가스에서 재료가 견딜 수 있도록 연소기 챔버의 내측 벽에 연료를 유동시켜 고온의 연소가스에 재료가 용융되거나 손상되지 않도록 한다. 일반적으로 재생냉각 방식의 액체로켓 연소기 챔버 내측 벽에 사용하는 재료는 열전도성이 좋으며 가격적으로 비싸지 않고 제작이 용이한 구리 계열의 금속을 사용한다. 선진 외국의 경우 순수한 무산소동(OFHC)은 재료의 강도가 일반적인 금속에 비하여 작기 때문에 사용하지 않고 크롬, 은 또는 지르코늄등을 포함시켜 재료의 물리적, 기계적인 성능을 향상시킨 구리합금(copper alloy) 재료를 사용한다.

현재 국내에서는 크롬과 기타 성분을 조절하여 제작한 구리합금을 이용하여 재생냉각 방식의 연소기 챔버의 제작에 사용하고 있다. 본 연구에서는 이 재료를 이용하여 상온 인장시험을 수행하여 재료의 기계적인 물성을 획득하고 이 데이터를 이용하여 재생냉각 챔버 채널부의 상온 상태의 탄-소성해석을 수행하였다. 이 해석 데이터는 간단한 형태의 시편을 제작하고 수압 시험을 수행하여 해석 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 구리합금(copper alloy) 재료시험

재생냉각형 연소기 챔버의 구조설계를 하기 위해서는 사용하고자하는 재료의 정확한 기계적인 물성 값들과 물리적인 물성 값들이 필요하다. 외국의 경우 액체로켓 연소기 챔버에 사용하기 위한 최적의 재료를 선정하기 위하여 여러 가지 재료를 선정하고 제작하여 각 재료별 특성에 대하여 연구하였다.[1] 본 연구에 사용된 재료는 크롬이 함유된 구리합금이다. 재료시편은 ASTM A 370-96 규격[2]에 따라 제작하였으며 15톤 용량의 UTM4206으로 1 mm/min 속도로 인장시

험을 수행하였다. 변형률 측정은 게이지 길이 25mm의 익스텐소메타(extensometer)를 이용하여 측정하였다. 재생냉각 챔버의 제작공정에는 브레이징(brazing) 공정이 포함된다. 이 브레이징 공정은 접합하고자하는 모재사이에 필러 금속(filler metal)을 넣고 약1000℃로 진공로에서 가열하여 접합하는 제작 공정으로 사용하는 구리합금이 거의 재료의 용융온도에 근접하기 때문에 재료의 연화현상이 발생한다. 따라서 브레이징 공정을 거친 재료와 열적인 영향을 받지 않은 본래의 재료사이에 기계적인 물성의 변화를 측정하기 위하여 각각 6개씩의 시편에 대하여 수행하였다. 브레이징 후 재료의 중요한 기계적인 물성 데이터들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Material Properties of Copper Alloy after Brazing

| 시편 No. | Tensile Stress(MPa) | Yield Stress(0.2%) | Young's Modulus(GPa) |
|--------|---------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 189.3 | 44.405 | 73.357 |
| 2 | 196.2 | 49.494 | 91.242 |
| 3 | 189.5 | 47.381 | 77.681 |
| 4 | 195.4 | 65.461 | 78.871 |
| 5 | 189.1 | 43.225 | 671.145 |
| 평균 | 191.90 | 49.99 | 198.46 |

브레이징 제작공정 전의 크롬동 구리합금의 최대응력(maximum engineering stress) 평균값은 6개의 재료시편 중 최대값과 최소값을 제외하고 507.64 MPa이다. 0.2% 오프셋(offset)한 평균 항복응력 값은 463.05 MPa이다. 그리고 평균 탄성계수 값은 145.05 GPa이다.

재료의 인장시험 결과 브레이징 공정 전후 재료의 물성 값들의 변화가 매우 크다는 것을 알 수 있다[3, 4]. 재료의 항복응력은 약 90%정도 감소하였으며 탄성계수 값은 43%감소하였다. 따라서 재생냉각 챔버 채널부 설계는 이와 같이 변화된 물성치를 이용하여 설계해야 구조적으로

안정하고 신뢰할 수 있는 구조물이 될 수 있다.

Figure 1은 브레이징 전의 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 2는 구리합금이 브레이징 공정을 거친 후 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.

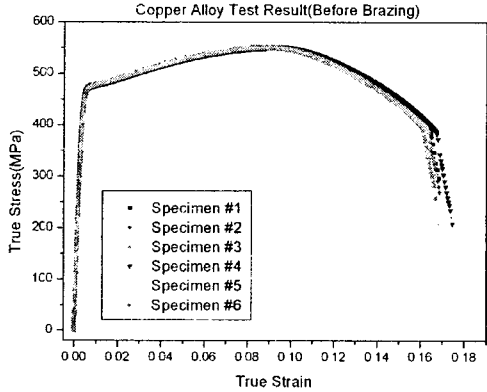


Fig. 1 Tension Test Results of Copper Alloy before Brazing

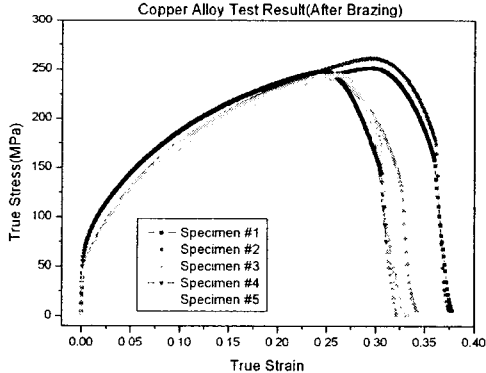


Fig. 2 Tension Test Results of Copper Alloy after Brazing

2.2 재생냉각 연소기 채널부 탄소성 구조해석

연소기 챔버의 냉각 채널부는 동일한 형태의 채널 형상이 반복적으로 배치되기 때문에 1개 채널에 대한 형상을 모델링하였다. 채널의 리브(rib)와 두께는 1 mm로 설계하였으나 가공오차에 의하여 채널의 두께가 위치에 따라 변화하여 스트레인 게이지 부착 위치의 두께를 기준으로

탄소성해석을 하였다. 탄-소성 해석은 상용유한 요소해석 프로그램인 Marc를 사용하여 채널 폭 2.0 mm, 2.2 mm, 2.5 mm 그리고 3.8 mm의 채널에 대하여 수행하였다. 해석에 사용한 재료의 물성 값들은 단축 인장시험에서 얻은 데이터를 사용하였다. 해석조건으로 Von-Mises 항복조건을 사용하였으며 재료는 항복이후 등방경화(isotropic hardening)를 한다고 가정하였으며 가공경화(workhardening) 기울기는 단축인장시험에서 얻은 응력-변형률 곡선에서 소성 변형률에 대하여 구간별로 선형적으로 근사하여 사용하였다.

2.3 평판 재생냉각 채널 시편 강도시험

연소기 챔버 채널의 상온 탄소성 구조해석 결과를 검증하기 위하여 채널 폭이 2.0 mm, 2.2 mm, 2.5 mm 그리고 3.8 mm의 강도시험 시편을 제작하였다. 제작의 용이성 및 비용을 고려하여 평판형태의 시편을 제작하였다. 이 평판형태의 시편 제작은 연소기 챔버 제작 공정과 동일하게 제작하여 평판시편과 연소기 챔버가 제작 공정에 따른 차이점이 발생하지 않도록 하였다. 이 평판 시편을 수압시험을 하기 위하여 물을 공급하는 입구와 출구라인을 부착하였으며 수압시험 중 가압압력을 측정하기 위하여 압력측정 라인을 1개 물 공급 라인에 부착하였다. 압력에 따른 채널부의 변형을 측정하기 위하여 kyowa의 2축 스트레인 게이지(strain gage)를 채널의 중앙에 부착하였다. 압력에 따른 변형률을 측정하기 위하여 평판시편에 총 6개 또는 12개의 스트레인 게이지를 부착하였다.

3. 결 과

3.1 평판시편 탄소성 구조해석 결과

여러 형태의 재생냉각 채널 폭에 대하여 탄소성 해석을 수행한 결과를 Table 2-5에 나타내었다. 해석에 사용한 채널의 두께는 평판 시편의 수압시험 후 절단하여 측정된 데이터를 사용하

였다. 탄소성 해석 결과 재생냉각 채널의 두께가 매우 작기 때문에 약간의 두께 변화에 따라 채널에 미치는 영향이 매우 크게 나타났다. 해석에 사용한 채널의 두께는 스트레인 게이지 부착위치에서 가장 큰 두께와 가장 작은 냉각 채널 두께에 대하여 탄-소성 구조해석을 수행하였다. 탄-소성 구조해석 결과 탄성영역에서는 해석결과가 강도시험 결과보다 크게 예측하였으며 소성 영역에서는 해석 결과가 강도시험 결과보다 작게 예측하였다.

Table 2. Analysis Results of Channel width 2.0 mm

| 압력 (bar) | 두께 0.78 mm (Total Strain) | 두께 0.85 mm (Total Strain) |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| 49.76 | 3.04813E-4 | 2.59399E-4 |
| 100.23 | 6.31567E-4 | 5.35689E-4 |
| 150 | 0.00109 | 8.74558E-4 |
| 198.64 | 0.00191 | 0.00143 |

Table 3. Analysis Results of Channel width 2.2 mm

| 압력 (bar) | 채널 두께 0.68 mm (Total Strain) |
|----------|------------------------------|
| 51.43 | 4.05138E-4 |
| 100.21 | 0.00106 |
| 157.4 | 0.00205 |
| 205.8 | 0.00536 |

Table 4. Analysis Results of Channel width 2.5 mm

| 압력 (bar) | 두께 0.81 mm (Total Strain) | 두께 0.85 mm (Total Strain) |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| 50.45 | 4.1756E-4 | 3.7867E-4 |
| 100.05 | 9.13582E-4 | 8.06449E-4 |
| 150 | 0.00195 | 0.00161 |
| 200.01 | 0.00421 | 0.00326 |

Table 5. Analysis Results of Channel width 3.8 mm

| 압력 (bar) | 두께 0.92 mm (Total Strain) | 두께 0.94 mm (Total Strain) |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| 72.59 | 0.000647059 | 0.000620506 |
| 101.04 | 0.0023604 | 0.00211313 |
| 150 | 0.00798416 | 0.007066163 |
| 202.31 | 0.0176551 | 0.0159372 |

3.2 평판시편 강도시험 결과

채널 폭이 서로 다른 4개의 평판 시편을 제작하여 수압시험을 수행하였다. Table 6-9에 각각의 채널 폭에 대한 강도시험 결과를 나타내었다. 강도시험 결과 채널 폭 3.8 mm인 경우 탄-소성 해석이 강도시험 결과보다 크게 예측하였으며 채널 폭 2.0 mm, 2.2 mm 그리고 2.5 mm에서는 강도시험 결과가 해석 결과보다 크게 나타났다.

Table 6. Strength Test Results of Channel width 2.0 mm

| 압력 (bar) | 최소값 (Total Strain) | 최대값 (Total Strain) | 평균 (Total Strain) |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 49.76 | 1.23992E-4 | 4.51898E-4 | 2.40215E-4 |
| 100.23 | 7.35729E-4 | 0.00221 | 0.00124 |
| 149.95 | 0.00162 | 0.00444 | 0.00258 |
| 198.64 | 0.00287 | 0.00674 | 0.00444 |

Table 7. Strength Test Results of Channel width 2.2 mm

| 압력 (bar) | 최소값 (Total Strain) | 최대값 (Total Strain) | 평균 (Total Strain) |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 51.43 | 2.26974E-4 | 3.96921E-4 | 3.00453E-4 |
| 100.21 | 9.01593E-4 | 0.00169 | 0.00125 |
| 157.4 | 0.00209 | 0.00353 | 0.00275 |
| 205.8 | 0.00377 | 0.00624 | 0.00493 |

후기

본 연구는 “소형위성 발사체(KSLV-I) 개발사업”의 일부분으로 진행한 연구결과입니다

Table 8. Strength Test Results of Channel width 2.5 mm

| 압력 (bar) | 최소값 (Total Strain) | 최대값 (Total Strain) | 평균 (Total Strain) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 50.45 | 1.59987E-4 | 2.8196E-4 | 2.17404E-4 |
| 100.05 | 0.00115 | 0.00174 | 0.00147 |
| 150.06 | 0.0024 | 0.00384 | 0.00336 |
| 200.01 | 0.00464 | 0.00657 | 0.00609 |

참고 문헌

1. Esposito, J. J.; Zabora, R. F., “Thrust chamber life prediction. Volume 1: Mechanical and physical properties of high performance rocket nozzle materials”, NASA-CR-134806, May 1975
2. Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product (ASTM A 370-96)
3. 정용현, 류철성, “액체로켓엔진 연소기 챔버 구조 설계”, 한국추진공학회지, 제8권, 4호, 2004, pp.36-42
4. 정용현, 류철성, 최민수, “액체 로켓엔진 사용재료의 상온 브레이징부 인장 강도 특성”, 한국추진공학회지, 제7권, 제4호, 2003, pp.73-79

Table 9. Strength Test Results of Channel width 3.8 mm

| 압력 (bar) | 최소값 (Total Strain) | 최대값 (Total Strain) | 평균 (Total Strain) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 49.31 | 4.2491E-4 | 4.52897E-4 | 4.40403E-4 |
| 101.04 | 0.00168 | 0.00171 | 0.0017 |
| 150 | 0.00408 | 0.00454 | 0.00437 |
| 202.31 | 0.00637 | 0.00973 | 0.00872 |

3. 결 론

재생냉각 액체로켓 연소기 챔버의 상온 구조설계를 하기 위하여 구리합금의 물성 값을 인장 시험을 통하여 획득하였으며 이 데이터를 이용하여 냉각 채널 형상에 대하여 탄-소성 해석을 수행하였다. 해석 결과의 검증은 평판형태의 강도시험 시편을 제작하여 수압시험을 통하여 확인하였다. 구리합금의 재료시험을 통하여 브레이징 공정 후 재료의 물성 저하가 매우 크다는 것을 알 수 있었으며 해석과 검증시험 결과를 통하여 재생냉각 채널부의 상온 구조설계 절차 및 기법을 확립하였다. 또한 채널의 두께가 매우 작기 때문에 제작상의 가공공차와 재료의 불균일성을 고려하여 채널부의 상온 구조설계를 수행해야함을 확인하였다.